

УДК 621.532.4

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДІАМЕТРА ТРУБОПРОВОДУ НА ПОШИРЕННЯ УДАРНОЇ ХВИЛІ У АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Г.М. Кривенко, М.П. Возняк, Л.В. Возняк, С.О. Кривенко

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727139,
e-mail: vozniaak@tvnet.if.ua

Забезпечення екологічної безпеки трубопровідного транспорту вуглеводневих енергоносіїв є одним із пріоритетних завдань у нафтогазовій галузі. Магістральні газопроводи є об'єктами підвищеної небезпеки. У випадку відмови магістральних газопроводів виникає ударна хвиля, яка є одним із чинників, що уражають. Маючи великий запас енергії, ударна хвиля є небезпечною для незахищених людей та довкілля. Із збільшенням відстані від епіцентра вибуху ударний тиск зменшується.

Досліджено зміну надлишкового тиску в момент виникнення вибухової хвилі від діаметра трубопроводу, часу та віддалі від місця пошкодження труби.

Проведено аналіз розподілу тисків у часі поза межами вибуху та визначено границі безпечних зон.

Ключові слова: газопровід, ударна хвиля, відмова, тиск

Обеспечение экологической безопасности трубопроводного транспорта углеводородных энергоносителей является одним из приоритетных заданий в нефтегазовой отрасли. Магистральные газопроводы являются объектами повышенной опасности. При отказе магистральных газопроводов возникает ударная волна, являющаяся одним из поражающих факторов. Имея большой запас энергии, ударная волна является опасной для незащищенных людей и окружающей среды. С увеличением расстояния от эпицентра взрыва ударное давление уменьшается.

Исследовано изменение избыточного давления при возникновении ударной волны в зависимости от диаметра трубопровода, времени и расстояния от места повреждения трубы. Проведен анализ распределения давления во времени за границами взрыва и определено границы безопасных зон.

Ключевые слова: газопровод, ударная волна, отказ, давление

The ensuring of ecological safety of pipeline transport of hydrocarbon energy carriers is one of the priority objectives in oil and gas industry. The main gas pipelines present the heightened danger. In case of main gas pipelines failure, a shock wave becomes one of the damaging factors. With a large energy content, the shock wave is dangerous for unprotected people and environment. The impact pressure decreases with the increase of distance from the explosion epicentre.

The change of the excess pressure in case of the shock wave with consideration of the pipeline diameter, time and distance from the pipe fault location was studied. The analysis of pressure distribution in time beyond the explosion limits was conducted and safe zones were defined.

Key words: gas pipeline, shock wave, failure, pressure

Трубопровідний транспорт – найбезпечніший спосіб постачання пожежовибухонебезпечних рідких та газоподібних вуглеводнів. Але для безпечної його експлуатації необхідно дотримуватися певного ряду обов'язкових умов.

Так, забезпечення безпеки трубопровідних систем в зонах їх проходження є багатоаспектною (інженерною, соціальною, правовою) проблемою. Її вирішення забезпечується комплексом нормативно-правових, виробничо-технічних та адміністративно-господарських заходів, які централізовано здійснюються та регулюються НАК "Нафтогаз України" за активної підтримки державних та місцевих органів влади.

До таких заходів відносяться:

- нормативно-правове регулювання безпеки;
- безперервне підвищення технічного рівня експлуатації, розвиток засобів автоматизації та телемеханізації;

- розвиток системи діагностування технічного стану та методів оцінки і прогнозування залишкового ресурсу трубопроводів та обладнання;

- удосконалення технології та організації поточних та капітальних ремонтів трубопроводів та обладнання;

- удосконалення організації контролю та нагляду за безпекою трубопровідного транспорту;

- покращення інформаційного забезпечення з питань безпеки газопроводів;

- удосконалення системи охорони магістральних газопроводів.

До найбільш серйозних невіршених проблем безпеки об'єктів магістральних трубопроводів відносяться наступні:

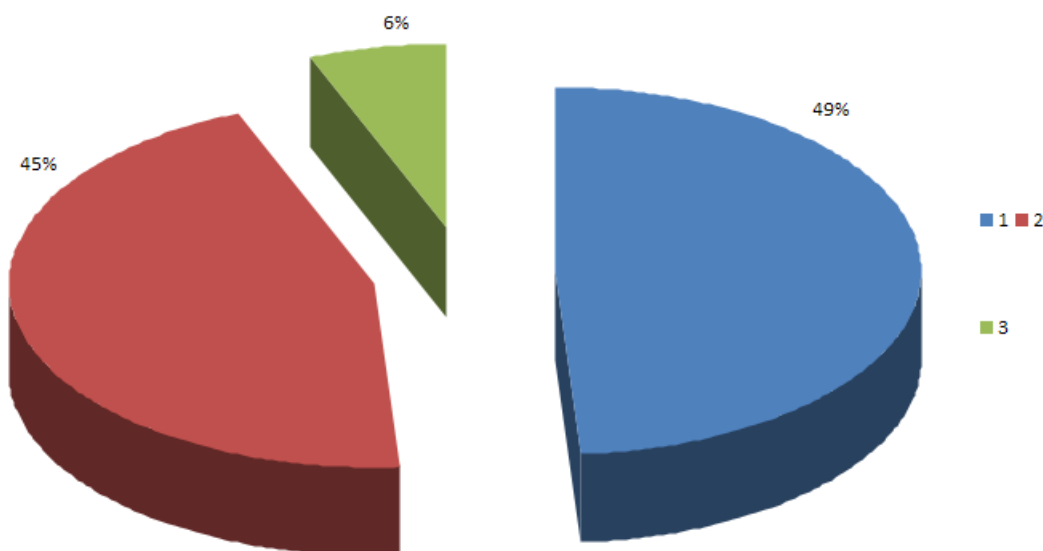
- стрес-корозія;
- несанкціоноване порушення охоронних зон та мінімальних віддалей від осі трубопроводу;

- зниження ресурсу обладнання компресорних станцій;

- обмежені можливості дефектоскопії трубопроводів;

- телемеханізація лінійних кранів;

- проблеми охорони магістральних газопроводів [1].



1- НС техногенного характеру; 2 - НС природного характеру;
3 - НС іншого (соціально-політичного) характеру

Рисунок 1 – Розподіл надзвичайних ситуацій (НС) за характером прояву

Всі згадані заходи спрямовані на підвищення екологічної безпеки при функціонуванні магістральних трубопроводів.

Нині газонафтотранспортний комплекс в Україні включає 37 тис. км газопроводів, 4,77 тис. км нафтопроводів. Довжина аміакопроводу Тольятті-Одеса складає 810 км. За даними ВАТ “Укрнафта”, на вказаних транспортних мережах щорічно відбувається, в середньому, від 1200 до 1500 аварій різного ступеня небезпеки, внаслідок чого сотні тонн вуглеводнів, що транспортуються, потрапляють у навколишнє середовище. На рисунку 1 наведено результати досліджень розподілу надзвичайних ситуацій за характером виникнення в Україні. Згідно з результатами досліджень найбільший внесок у сукупність надзвичайних ситуацій роблять надзвичайні ситуації техногенного характеру, які у 2008 р. склали 49 %. Тобто, необхідні заходи реагування, запобігання та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру як найбільш розповсюджених і загрозливих [2].

Отже, розроблення критеріїв виникнення та розвитку аварійних ситуацій, їх запобігання та прогнозування наслідків аварій є одним із першочергових завдань.

Аналіз літературних джерел свідчить, що на розв’язання науково-практичних проблем екологічної безпеки спрямовані інтелектуальні зусилля багатьох учених. Проблемі забезпечення техногенно-екологічної безпеки потенційно небезпечних об’єктів, зокрема паливно-енергетичного комплексу, присвячено багато наукових робіт, серед яких чільне місце займають праці та дослідження академіків Легасова В. А., Александрова О. О., Патона Б. Є., Мазура І. І., Іванцова О. М., Кондратьєва Я. Ю. та інших [1, 2, 3].

З аналізу джерел, присвячених проблемам екологічної безпеки, випливає, що існує необхідність у проведенні комплексних досліджень

щодо впливу чинників на характер поширення ударної хвилі у аварійних ситуаціях, що розглядається у даній статті.

Слід звернути увагу, що при відмові магістральних газопроводів ударна хвиля є одним з чинників, що уражають. Вона утворюється внаслідок розповсюдження в атмосфері природного газу, який під тиском “вирвався” із зруйнованого газопроводу, а також стиснених хвиль, які утворюються під час загоряння газового шлейфа з розповсюдженням продуктів згоряння.

Маючи великий запас енергії, ударна хвиля може уражати незахищених людей, зруйнувати різні споруди, будівлі, обладнання і техніку. Із збільшенням відстані від епіцентра вибуху швидкість розповсюдження ударної повторної хвилі та ударний тиск зменшуються. Безпечна відстань (Γ_b) від впливу ударної хвилі під час викидів газу з трубопроводу, що супроводжується спалахуванням, визначається за відомою формулою [1] :

$$\Gamma_b = K_g \cdot \sqrt[3]{W_T}, \quad (1)$$

де W_T - тротиловий еквівалент, т;

K_g - коефіцієнт пропорційності, величина якого залежить від характеру пошкодження навколишніх об’єктів, м/т.

Приблизно у половині випадків аварійного руйнування магістральних газопроводів загоряння газу відбувається безпосередньо на місці пошкодження. Характер горіння газу і масштаби впливу на довкілля залежать від багатьох чинників, основними серед яких є: робочий тиск і діаметр трубопроводу, густина ґрунту тощо. Виникнення аварійних розривів на магістральних газопроводах та технологічних газопроводах компресорних станцій пов’язане з такими фізичними ефектами:

- утворення хвиль стисання за рахунок розширення в атмосфері природного газу, який виривається під тиском з пошкодженої ділянки

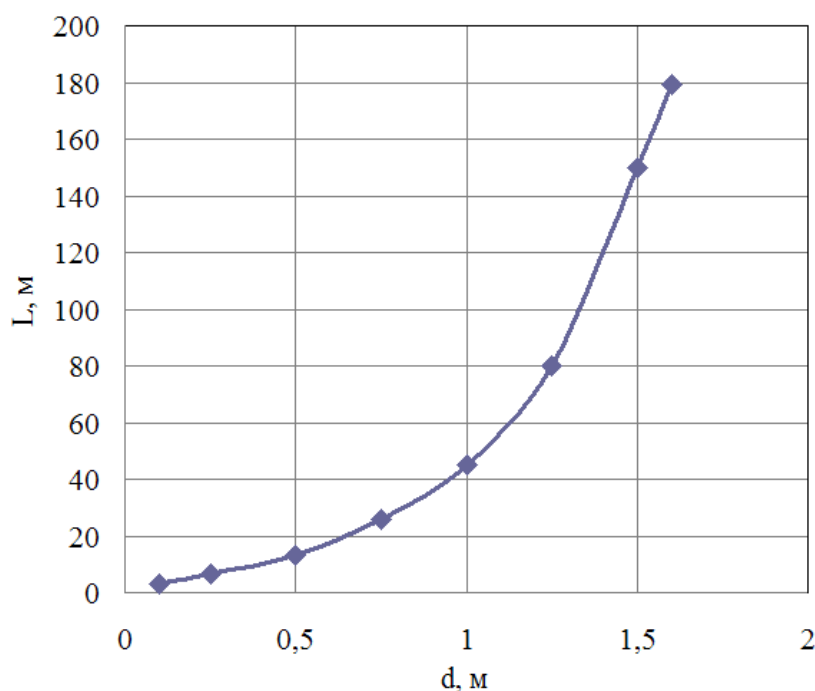


Рисунок 2 – Залежність осередненої протяжності аварійного розриву від діаметра газопроводу

трубопроводу, а також хвиль стискання, що утворюються у випадку спалахування газової хмари внаслідок розширення продуктів згоряння;

- утворенням та розлітанням фрагментів пошкодженої ділянки трубопроводу;
- термічною дією пожежі на навколишнє середовище.

Під час розгляду процесу пошкодження магістрального газопроводу можна виділити три стадії:

- зародження пошкодження;
- швидке поширення наскрізної тріщини вздовж тіла труби;
- гальмування і зупинка пошкодження.

В момент пошкодження ділянки газопроводу реалізується лише енергія стисненого газу. Загоряння газу може виникнути лише з деякою затримкою поза порожниною трубопроводу, тобто після змішування газу з повітрям до певних концентрацій (5...15 % за об'ємом) і при одночасному виникненні джерела запалювання з фізично необхідним енергетичним потенціалом.

Руйнування газопроводів, що експлуатуються при кільцевих напруженнях в тілі труби нижче межі плинності, може відбутися лише за наявності в тілі труби наскрізного дефекту, лінійні розміри якого вище критичних. Внаслідок цього на процес руйнування труби витрачається відносно незначна частина вихідної потенціальної енергії стисненого газу, яка складає 2...10 % (приймається 5 %).

Для розрахунку затрат енергії на утворення вирви в ґрунті необхідно вводити поправочний коефіцієнт, який для середніх ґрунтів дорівнює 0,65, а для щільних суглинків та глин – 0,8.

Отже, з урахуванням вищевказаного для напівсферичної хвилі тиску маса “тротилового еквіваленту” виражається так [1] :

$$M_m = 2 \cdot 0,95(0,65 + 0,8) \frac{M_z \cdot A_z}{Q_m}, \quad (2)$$

де M_z - маса стисненого газу, що бере участь у формуванні первинної ударної хвилі;

A_z - робота розширення одиниці маси газу, дж/кг;

Q_m - теплота згоряння тротилу ($4,24 \cdot 10^6$ дж/кг).

Відомо, що для магістральних нафтопроводів існує критичний розмір наскрізної тріщини по твірній труби, це приблизно чверть діаметра, при перевищенні якого і подальшому мимовільному росту тріщини призводить до розриву цілісності труби і ідентифікується як аварія. А якщо довжина тріщини менша критичної, то найімовірніше такий дефект не становить небезпеки.

Існує підтверджена статистикою кореляція між протяжністю розриву та технологічними параметрами газопроводу. Рекомендована авторами [1] залежність усереднених значень у функції діаметра газопроводу наведена на рисунку 2.

Оброблення актів дослідження аварій на магістральних газопроводах, які виникали за більш ніж двадцятирічний період їх експлуатації, показало, що руйнування газопроводів супроводжувалися в основному утворенням відносно невеликого числа фрагментів труб з їх розлітанням на відстані до 150...200 м. Встановлено також, що для сучасних марок “високотязких” сталей, що застосовуються для виготовлення газопроводів великих діаметрів, часто відбувається не розрив на шматки, а верхнє розвальцювання труб, часто по всій довжині пошкодженої ділянки і без викидання їх з траншеї.

Аналіз показав, що ймовірність механічно-го пошкодження різних реципієнтів осколками труб значно нижче ймовірності дії інших чинників, в першу чергу, термічної дії при загорянні газу. Кількісні характеристики пожежі (при рівних умовах) будуть визначатися в основному інтенсивністю аварійного викиду газу.

Ідентифікація аварійного розриву може проводитися операторами на компресорній станції за однією з двох характерних умов: або за падінням тиску на дві технічні атмосфери в нагнітальному колекторі компресорної станції, яка розташована до місця розриву (за напрямком руху потоку газу), або за спрацюванням антипомпажного захисту на компресорній станції, яка розташована після місця розриву (за напрямком руху потоку газу), зі зменшенням комерційної продуктивності у всмоктувальному колекторі на величину $Q_{k/1,1}$ [3].

Для моделювання аварійного пошкодження газопроводу використано рівняння поширення звуку в тривимірному просторі. При цьому розглядається сферична область високого тиску, навколо якої знаходиться нескінченна область однорідного тиску. Межею між ними є тверда стінка (трубопровід), і система знаходиться у стані рівноваги. При аварійному розриві межа миттєво зникає. Виникає вибухова хвиля.

Метою дослідження є знаходження зміни надлишкового тиску в момент виникнення вибухової хвилі в залежності від діаметра трубопроводу, часу t та віддалі від місця пошкодження труби.

Об'єктом дослідження є магістральний газопровід із значним терміном експлуатації.

Розрахуємо зміну надлишкового тиску у фронті ударної хвилі, використавши рівняння поширення звуку в тривимірному просторі, яке має такий вигляд [4]:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 \varphi. \quad (3)$$

У формулі (3) φ - потенціал швидкості, а компоненти швидкості дорівнюють

$$u_i = \frac{\partial \varphi}{\partial x_i}. \quad (4)$$

Тиск

$$P = -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t}, \quad (5)$$

де ρ - густина.

Для позначення тиску використаємо P , оскільки в подальшому будемо використовувати p для оператора Хевісайда.

Якщо φ - функція лише r і t , де r - віддаль від заданої точки, t - час, то

$$\begin{aligned} \nabla^2 \varphi &= \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = \\ &= \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (r\varphi). \end{aligned} \quad (6)$$

Звідси

$$\frac{\partial^2}{c^2 \partial t^2} (r\varphi) = \frac{\partial^2}{\partial r^2} (r\varphi). \quad (7)$$

Тепер форма рівняння (7) відповідає рівнянню коливання струни і поширення звуку в одновимірному просторі, залежна змінна дорівнює $r\varphi$.

Звідси загальний вигляд рівняння має такий вигляд:

$$r\varphi = f(r - ct) + g(r + ct). \quad (8)$$

Перший член рівняння описує розбіжну хвилю, другий - збіжну.

Розглянемо сферичну область високого тиску, навколо якої знаходиться нескінченна область однорідного тиску. Границею між ними є тверда стінка, тоді система знаходиться у стані спокою. Нехай границя миттєво зникає, потрібно знайти подальший напрямок руху газу. Припустимо, що масові швидкості незначні, щоб можна нехтувати квадратами зміщень. В усіх точках при $t > 0$ виконується (3). Позначимо через P надлишковий тиск в порівнянні з незбуреним тиском поза сферою. Оскільки спочатку був стан спокою, φ стала всюди і може бути прийнята рівною нулю. Надлишковий тиск тоді буде

$$P = -\frac{\rho \partial \varphi}{\partial t}. \quad (9)$$

В початковий момент тиск дорівнює додатній константі P_0 при $r < a$ і нулю при $r > a$. Допоміжне рівняння має такий вигляд:

- за умови ($r < a$)

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} - \frac{p^2}{c^2} \right) (r\varphi) = \frac{P_0}{\rho c^2} pr; \quad (10)$$

- за умови ($r > a$)

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} - \frac{p^2}{c^2} \right) (r\varphi) = 0.$$

Після математичних перетворень зміна тиску в залежності від часу та відстані від центра вибуху має такий вигляд [4]:

$$\begin{aligned} P = -\frac{P_0}{2r} \left((ct - r)H\left(t - \frac{r-a}{c}\right) - \right. \\ \left. - (ct - r)H\left(t - \frac{r+a}{c}\right) \right), \end{aligned} \quad (11)$$

де P_0 - надлишковий тиск в трубопроводі до моменту аварії;

r - радіус трубопроводу;

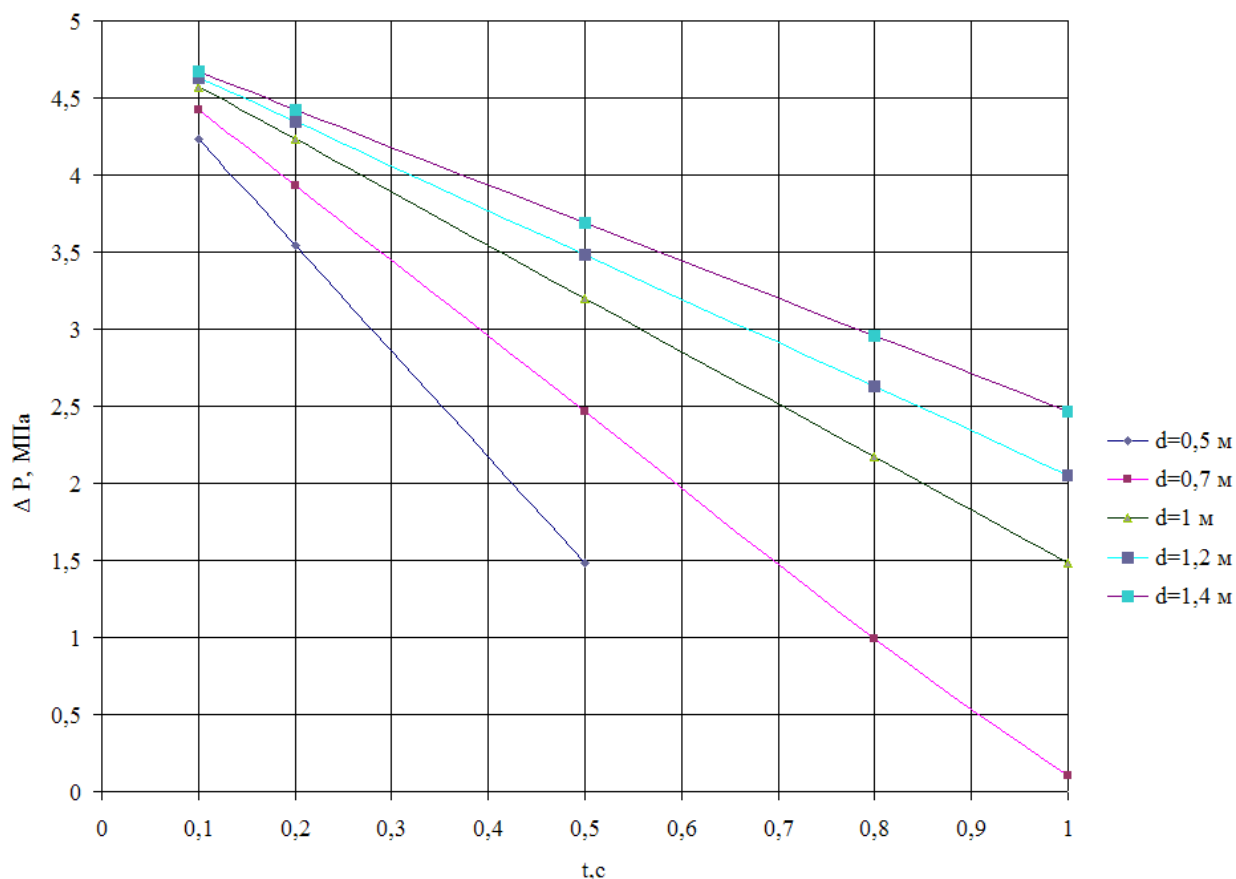
c - швидкість поширення ударної хвилі;

α - віддаль від центра вибуху;

p - оператор Хевісайда;

$H(t)$ - одинична функція Хевісайда, $H(t) = 1$ при $t > 0$.

Для даного $r > a$ тиск дорівнює нулю до моменту часу $(r-a)/c$, коли прибуває перша хвиля із стисненої області, і після моменту $(r+a)/c$, коли приходить хвиля із найбільш віддаленої точки. У проміжні моменти часу тиск дорівнює $P_0(r - ct)/2r$, тобто $P_0a/2r$ в момент надходження першої хвилі, - $P_0a/2r$ в момент проходження

Рисунок 3 – Залежність зміни тиску від часу для різних діаметрів трубопроводу при $a = 0,7$ м

останньої і лінійно змінюється в проміжку. Стисненню на передньому фронті хвилі відповідає розрідження на задньому фронті.

Всередині сфери тиск дорівнює

$$P = P_0 \left[\left(1 - \frac{1}{2r} \left(\frac{c}{p} + a \right) \right) (e^{-p(a-r)/c} - e^{-p(a+r)/c}) \right]. \quad (12)$$

Тиск дорівнює P_0 до моменту $(a-r)/c$, після чого миттєво спадає до $P_0(1 - a/(2r))$, лінійно зменшується з часом до тих пір, поки не досягне $-P_0 a/(2r)$ в момент $(a+r)/c$, а потім миттєво зростає до нуля.

Нескінченний тиск в центрі існує лише миттєво, оскільки час існування такого збурення в даній точці дорівнює $2r/c$ і прямує до нуля в центрі. Він виникає внаслідок одночасного утворення елементарних хвиль з усіх точок поверхні, в інших точках хвилі від різних ділянок приходять в різний час, що призводить до кінцевого збурення тиску в кінцевому інтервалі часу. Якщо $r > 1/(2a)$, тиск стає від'ємним, як тільки відбувається збурення. Поява нескінченності в розв'язку означає, що не можна нехтувати квадратами збурень всередині певного діапазону r і t , однак цей діапазон тим менший, чим менший P_0 .

Поведінка швидкості у віддалених точках аналогічна поведінці тиску. Якщо u – радіальна складова швидкості, то

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial r} = -\frac{p\varphi}{c} - \frac{\varphi}{r}. \quad (13)$$

Якщо r великий, перший член рівності дорівнює $\rho \cdot P/c$, і його поведінка очевидна. Він пропорційний $1/r$, другий член пропорційний $1/r^2$. Перший член не дає інтегрального зміщення за напрямком від центра, оскільки рух від центра на етапі росту тиску одразу не компенсується зворотними зміщеннями на етапі спаду тиску. Однак другий член описує невеликі швидкості, які зникають на початку і в кінці хвилі і досягають додатного максимуму в момент r/c . Він дає результуюче радіальне зміщення порядку a/r від максимальної амплітуди першого члена; це відображає цей факт, що спочатку стиснена речовина розширюється до цих пір, поки не досягне нормального тиску, і оточуюча речовина відходить, щоби звільнити йому місце.

Для аналізу можливих наслідків від виникнення аварії на магістральному газопроводі визначимо характер зміни тиску від центра вибуху в залежності від діаметра трубопроводу, часу та віддалі від центра вибуху, використавши залежність (11). Результати розрахунків наведено на рисунках 3, 4, 5, 6, 7.

Із аналізу, наведених на рисунку 3 графіків, випливає, що з віддаленням від епіцентра вибуху 0,7 м із збільшенням діаметра трубопроводу від 0,5 м до 1,4 м зміна тиску ударної хвилі внаслідок розриву труби найменшого досліджуваного діаметра на 0,5 секунди становить 1,5 МПа, а при розриві труб найбільшого діаметра – 3,7 МПа, а за секунду після вибуху

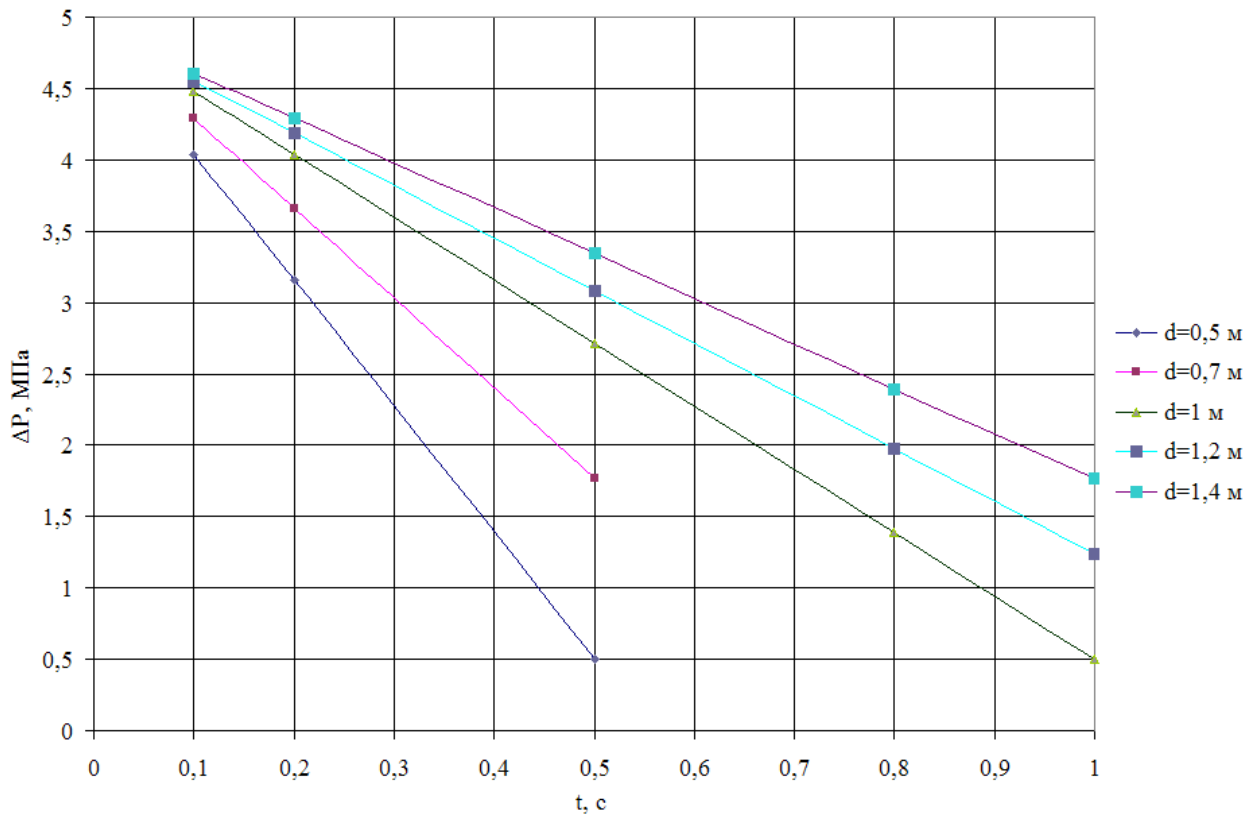


Рисунок 4 – Залежність зміни тиску від часу для різних діаметрів трубопроводу при $a = 0,9$ м

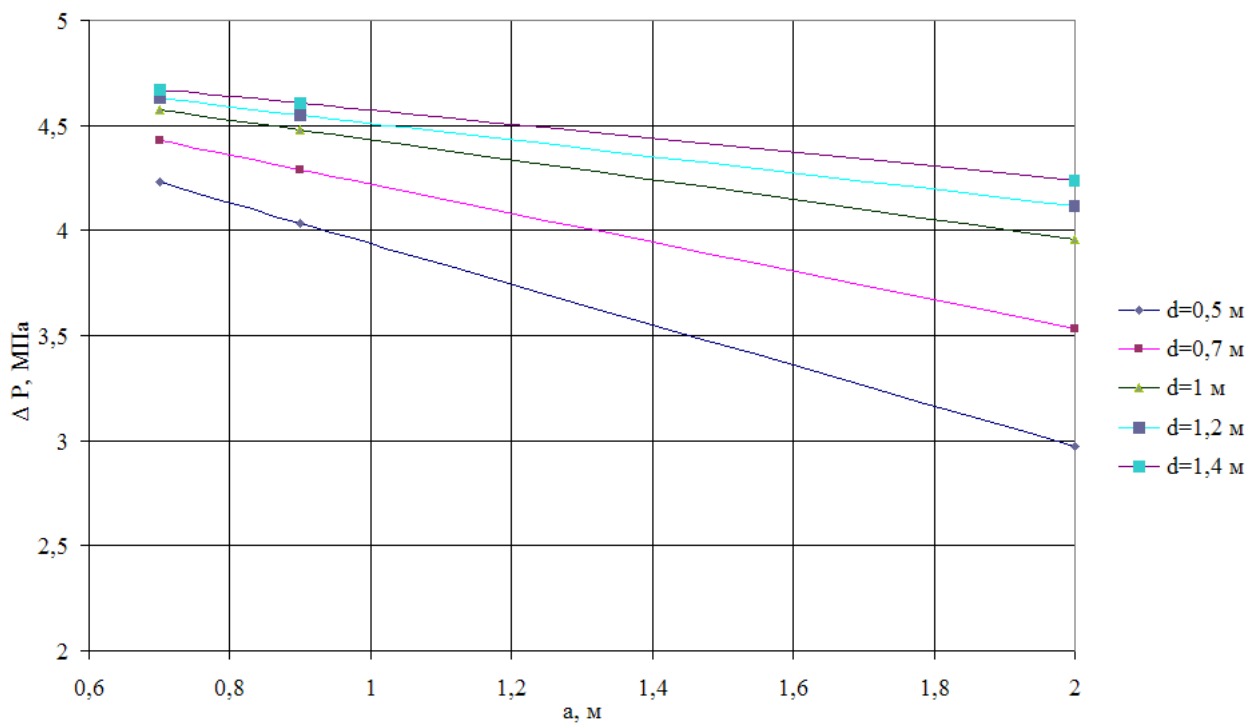


Рисунок 5 – Залежність зміни тиску від центра розриву для різних діаметрів трубопроводу при $t = 0,1$ c

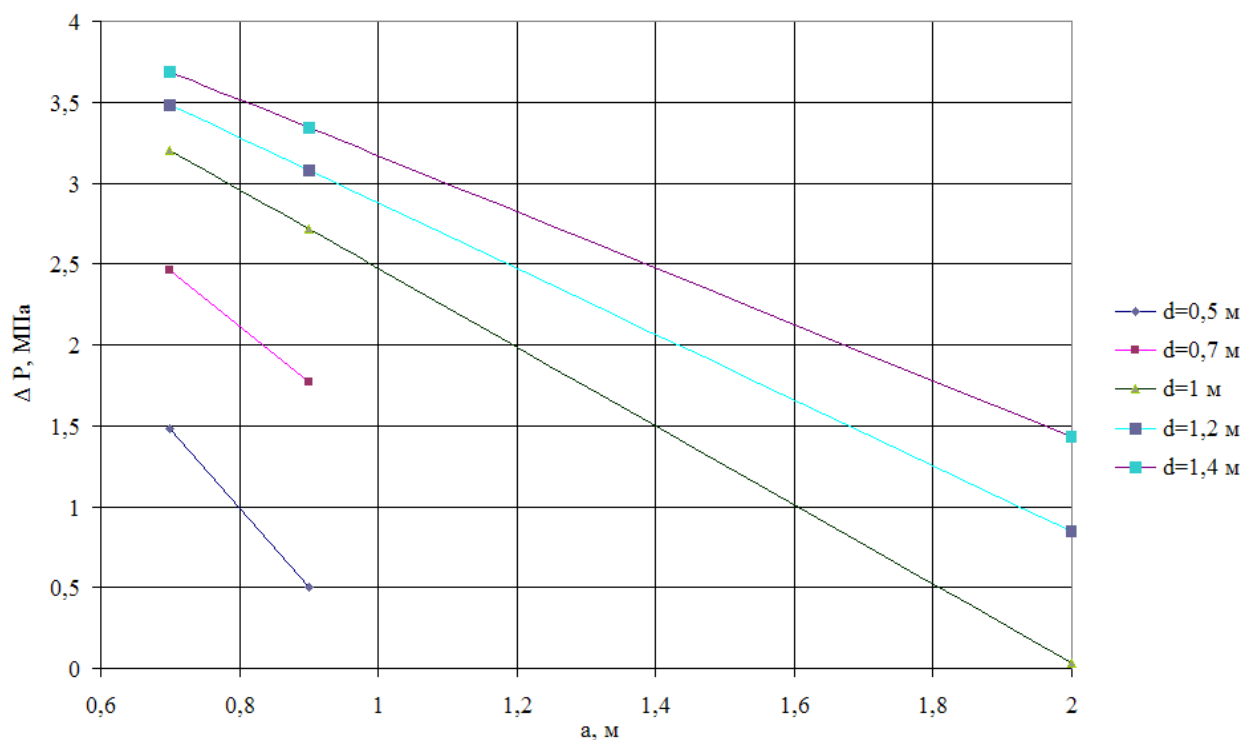


Рисунок 6 – Залежність зміни тиску від центра розриву для різних діаметрів трубопроводу при $t = 0.5$ с

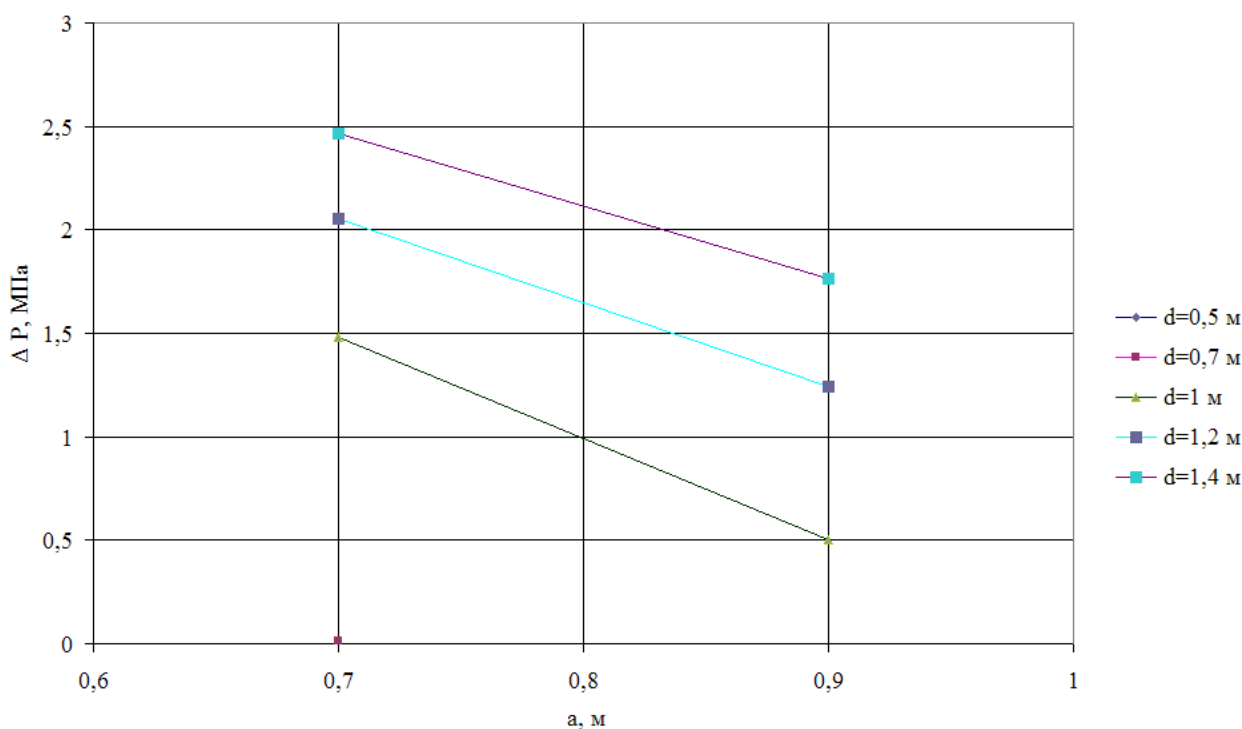


Рисунок 7 – Залежність зміни тиску від центра розриву для різних діаметрів трубопроводу при $t = 1$ с

на тій же віддалі надлишкові тиски у вибуховій хвилі виникають лише при діаметрах трубопроводу 1 м і більше (рис.7).

Висновки

Для прогнозування можливих наслідків від виникнення аварії на магістральному газопроводі визначено характер зміни тиску від центра вибуху в залежності від діаметра трубопроводу, часу та віддалі від центра розриву.

Із аналізу проведених досліджень випливає, що ударна хвиля, яка виникає внаслідок розриву газопроводів, не несе прямої загрози для життя людини, яка знаходиться більше 30 метрів від центра розриву, і не здатна пошкодити споруди, що знаходяться за межами існуючих нормативних розривів. Це підтверджує аналіз графіків, наведених на рисунках 3-7 та в [1].

Подальший напрямок досліджень полягає у розробленні багатофункціональної системи забезпечення екологічної безпеки магістральних газонафтопроводів.

Література

- 1 Мазур И. И. Безопасность трубопроводных систем / И. И. Мазур, О. М. Иванцов. – М.: ИЦ “Елима”, 2004. – 1104 с.
- 2 Шиян В. Д. Террористичні загрози та безпека трубопроводних систем ПЕК України / В. Д.Шиян // Національна безпека: український вимір: щокв. Наук.зб. Ради нац. Безпеки і оборони України, інститут проблем нац. Безпеки. – К.: 2009. – Вип.3. – С.38-42.
- 3 Мазур И. И. Конструкционная надежность и экологическая безопасность трубопроводов / И.И.Мазур, О.М.Иванцов, О.И.Молдованов. – М.: Недра, 1990. – 263 с.
- 4 Джеффрис И. Методы математической физики / И. Джеффрис, Б. Свирлс. – М.: Мир, 1970. – Вип.3. – 344 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії
24.02.14

Рекомендована до друку
професором **Грудзом В.Я.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
канд. техн. наук **Степ'юком М.Д.**
(УМГ «Прикарпаттрансгаз»,
м. Івано-Франківськ)